

超軟 X 線写真による木材内部構造の研究

(第 1 報) 針葉樹材の年輪構成について

畔 柳 鎮・西 田 晃 昭

Studies on the inner structure of wood by the ultra-soft
X-ray photograph.

I. On the constitution of annual ring of coniferous woods.

Shigeru KUROYANAGI and Teruaki NISHIDA

X-ray can penetrate opaque materials such as wood, however the degree to which X-ray radiation penetrates depends upon density and thickness of cellwalls or specimens of wood and timbers. Penetration of the large order of wave length of X-ray is weaker than that of the short order of wave length.

This work is one of the studies on the inner structure of wood and timbers by the ultra-soft X-ray (the longest wave length), and in this paper the constitution of annual rings of some coniferous wood is showed and examined by the ultra-soft X-ray photographs.

The photographic conditions are as follows:

Instrument; SOFTEX-EMB. Secondary voltage; 14 KVP.

Secondary electric current; 5 mA. Distance of specimens and X-ray tube; 40 cm.

Thickness of specimens (crosssection to the longitudinal); 0.7 cm. Radiation time of X-ray; 10 sec. Developing time of photographic film; 10 min. at 20°C.

The experimental results are showed in photos. 1~6, and a clear contrast on X-ray films was brought out between the tissues of annual rings, spring and summer woods, false rings and coloured bands, compression wood, branches and knots. This seems to be on available method for studies of the inner construction of woods and timbers.

ま え が き

木材の内部組織の研究や木材加工品の品質管理上幹の内部とか、木材加工品の接合部などを未破壊のまま透視したいことがしばしばある。これに対して、従来用いられたのは γ 線や X 線の間接撮影であって、古美術研究の手段として仏像の内部透視図を撮影した例や木材内部における腐朽の検出に用いられた例がこれである。¹⁾²⁾³⁾ しかしながら当時のものは、X 線では物体の大きさを考えて、高電圧の硬 X 線を用いたために、その透過力は強く、木質部分による吸収はほとんどみられず、撮影された写真も内部に介在する金属や磁物の陰影のみは明瞭にキャッチされたが、腐朽部分や傷など、その存在が僅かに認められる程度で木材組織の陰影の撮影はむずかしかった。これに対して最近開発された超軟 X 線では、その波長は長く、したがって物体内での透過力は

弱く、金属や鉱物はもちろんのこと、有機物でもその厚さや密度によって陰影の明度を異にするため、生物体の内部構造の透視写真も比較的容易に得られるようになった。

筆者らは、2年程前よりスギ肥培木の材質に関する研究を続けてきたが、特に肥培スギに多く出現する偽年輪状の着色帯の内部構造の研究手段として、この超軟X線による木口撮影を行なったところ、肉眼や従来の顕微鏡では見ることのできない鮮明な内部透視写真が得られたので、さらにこの方法による研究を進めて、未破壊のまま木材の内部構造を透視する方法を確立してみたいと思った。

たまたま昭和40年度文部省科学研究助成金（各個研究）の補助をこの問題に対して交付されることとなったので、ここに第1報として、スギ肥培木およびヒノキ、アカマツなどの針葉樹の年輪の木口写真の撮影条件と二、三の実例を示して、この超軟X線写真像による針葉樹の年輪構成の考察を報告したいと思う。文部省の科学研究費の援助に対して感謝の意を表するとともに、撮影に協力された本学学生佐山、坂野両君の労に深く感謝する。

§ 1. X線の性質と超軟X線

真空放電管中で、残留ガス圧が一定になると、その陰極に面した管壁は陰極線の衝突のため螢光を発するが、同時に管外の種々の物質にも螢光を生じ、写真乾板に影響を与えることが1895年 W. K. Röntgen によって発見され、この放射線の特異な性質として物体内での透過力が強く、光線に不透明な人体が、X線に対しては透明であることもわかり、この未知の放射線に対して、X線と名付けられた。その後1912年に至って、これが電磁波であることが確認され、さらにこれは両極に加える電位差によって変化し、電位差が大になるにしたがってその波長は短かく、且つ物体内の透過力も強くなり、その大いさをX線の硬度と呼ばれるようになった。さらにX線管球の製造技術の進歩によって、これとは逆に低電位差の軟X線、さらには超軟X線などの長波長で、しかも極めて狭い範囲内のX線を放射する管球も製造されるようになった。

§ 2. 生物体におけるX線の吸収

X線の特性として、物体内での透過力は強いが、一部では吸収されて熱となり、X線が物体内を通過するとその強さは次第に減少する。一つの方に厚さ x だけ通過した後のX線の強さを I とすれば、それからさらに厚さ dx だけ通過するときの強さの減少 $-dI$ は、 I 及び dx に比例するので、比例常数を μ とすれば

$$\begin{aligned} -dI &= \mu I dx \\ \frac{dI}{I} &= -\mu dx \end{aligned} \quad (1)$$

I_0 を $x=0$ における強さとすれば

$$\begin{aligned} \log I &= -\mu x + \log I_0 \\ \log\left(\frac{I}{I_0}\right) &= -\mu x \\ I &= I_0 e^{-\mu x} \end{aligned} \quad (2)$$

μ は吸収係数と呼ばれ、これは波長物質の密度、構成物質の種類によって異なる。したがって λ をX線の波長、物質の原子番号を Z 、密度を ρ で現わし、さらにこの b を常数と考えると

$$\mu = b \lambda^3 Z^4 \rho \quad (3)$$

で与えられる。

$$\therefore I = I_0 e^{-\mu \lambda^3 z^4 \rho} \quad (4)$$

となって、X線写真撮影の際のフィルム上の陰影の明度はこの透過X線の強さ I に関係するから、X線の波長、物質の原子番号、密度、および厚さによって決定されることになる。

§ 3. 木材内部の透視写真と超軟X線

前述の(4)式において、木材の内部組織の透視撮影におけるフィルム面での陰影は、使用X線管球の放射X線の波長、木材組織中の構成物質の原子番号とその密度および試料の厚さに関係する。

X線の波長は管球の電圧によって異なるが、超軟X線域の波長では、その数字が大となるので、吸収量は大きくしたがって影像是薄くなる。また試料の厚さも同様に厚くなると透過率は減ずるので、画像を弱める。しかし木材の組織には空隙も多く断面における構成も一様でないので、試片の厚さを一定にしても各透過断面における細胞組織の相対的な厚さは異なる。したがってその相対的な厚さの変化によって、当然フィルム面には明暗の陰影が形成されることになる。

構成物質は木材組織中に含まれる成分中、有機物を形成する C. H. O 以外には筆者の前に発光分光分析に関する研究で報告したように⁷⁾、N. P. K. Ca などの肥料元素、その他 Fe. S. Mg. Si. B. Mn. Zn. Mo などの微量元素も含めて、それぞれの原子番号と密度に関してX線の吸収量も異なるが、その量は微量で散在するから、陰影としてキャッチされるのは困難である。ただこれが一カ所に固まって存在する場合、たとえば分泌組織中のものとか、金属や砒物として内部に介入している時は、その影像是極めて鮮明である。すなわち主体元素である繊維素の C. H. O よりはこれらの物質の成分は明らかに原子番号も大きく且つ密度も大であるからである。

ここに一言したいことは、構成物質の密度 ρ に対する木材組織の密度についてであるが、これは前述せるように、内部の孔隙とも関係し、したがって断面の相対的厚さとも関係してくることである。たとえば木口断面において、一定の厚さの試片において、春材と夏材では当然細胞膜の厚さも異り大いさも異なるので、X線を透過する絶対的な層の厚さも当然異なってくる。したがってその層の容積重にも差を生ずるとともにその層中に含まれる成分の量もちがってくる。この容積量、絶対的厚さ、成分量のちがいが、相乗されて、木材組織の密度となって現われるので、それぞれの断面において、極めて明瞭なコントラストを形成することとなるのである。

§ 4. 装置ならびに撮影条件

超軟X線発生装置としては、株式会社小泉X線工社製の SOFTEX-EMB 型を用いた。この装置は比較的低電圧で多量のX線を照射し、かつ二重焦点 2.0/0.3mm KB-2M 型ベリリウム窓管球を装備したものである。二次電圧最高 40 KVP、二次電流は大焦点の場合は最大 10 mA (30 sec) 小焦点の場合は最大 3 mA (60 sec) である。

使用フィルムは富士ソフテックス用フィルム、指定現像液にて、20°C で10分間現像で、仕上印画のコントラストが最適となるための試片の厚さ、距離、および二次電圧、電流の諸条件を最初に予備実験として種々検討した。このときX線管球と試片との間の距離は40cmで固定し、その下に黒い遮光紙で包んだフィルムを置き、厚さ 0.5~1.0cm までの針葉樹木口円板を撮影すると、大焦点で二次電圧 14 KVP、二次電流 5 mA、X線照射時間10秒で春材と夏材のコントラストの

鮮明な画像が得られることがわかった。

試片の厚さについては前項で述べたように、これが増すにつれてX線の吸収は大となるため、二次電圧を高め照射時間を長くする必要がある。その度合は次の実験結果の説明において述べる。

§5. 実験結果

超軟X線による針葉樹木口写真の実例として、まず第一に示したものは、岡山県勝田郡産のスギ肥培木の写真であるが、photo. 1 の a は円板の表面を写した普通写真であって、実はこの円板には撮影条件を決定する色々のものを含んでいるものである。まず上部と下部の厚さが変わること、左側の方にわざと階段をつけてその厚さを急に覚えてみてあること、表面は鋸断したままであること、上部に3カ所のそれぞれ異った方向の穿孔虫の喰害した孔を有すること、スギの肥培木であるため偽年輪と偽年輪様の着色帯がみられること、その他樹皮を一部つけていることなどである。

(1) 厚さについて

木口方向からのX線の透過率は、幹に直角方向よりも遙かに大きい。これは針葉樹の仮導管が幹軸の方向に長いのである。しかし撮影条件として、二次電圧14 KVP、二次電流5 mA、照射時間10秒で、10分間現像の印画で、くっきりと明らかに年輪模様が写し出される。このことは各組織によって吸収率が異なることを示すものでネガフィルムにおいて春材部分は黒く、夏材部分は白く、その明暗のコントラストは極めて鮮明である。すなわち春材層はX線の吸収少く夏材層は吸収の多かったことがわかる。いまそのネガフィルムをポジ写真として示すとphoto. 1 の b のような透視写真が得られる。ここに黒化度の高い部分は、逆にX線の吸収の多かった部分である。厚さの変化に対しては上部は厚いために吸収多く、下端は薄いためにX線の透過量は多く、ポジ写真ではハレーションを起したように写る。どの程度の厚さが適当であるかは研究対象となる各組織の部分によって異なり、春材層では0.5~1.0cm、夏材層では0.3~0.5cm、偽年輪や着色帯では0.5~0.8cmが適当な厚さと考えられる。だがX線は管状から直進するためあまり厚くなると外側より第2年輪の上部の夏材層にみられるように繊維の乱れとか、旋回木理にわざわざいわれて、画像がぼけるのでこの場合はできるだけ薄くして、電圧や照射時間で調節する方がよい。

(2) 表面の精粗と傷について

木口面における年輪や偽年輪模様を撮影する場合には別に鉋をかけて平滑にする必要もないが、photo. 1 の a と b を比較すればわかるように春材などで大きく鋸の目によって欠けた部分は、やはり相対的にその部分だけ厚さが薄くなる結果X線の透過は大となり画像にむらができるので、できれば鉋削する方がよい。しかしながら鋸断のままの粗荒な表面で普通写真ではよくわからなかった年輪や、偽年輪模様が実にきれいに写し出されることも超軟X線写真の大きな特徴であろう。左側の階段状の厚さ変化は、他の傷とも共通することであるが、厚さとの相対的深さによって、画像への影響は異なる。あまり差が大きい間はほとんど画像には出てこない。

一方穿孔虫による喰害などは、表面では見えない部分までが写し出される。すなわち上部に横にあげられた孔は裏側までとおっておらず、また左側の孔は斜に裏まであいた孔、中間のや

や上よりの孔は表裏とも見えない孔がそれぞれ3つとも三様の影像としてキャッチされている。

(3) 春材と夏材

春材と夏材のX線写真上のコントラストの激しさは、前述のように当然X線の吸収量の差を現わしているが、これは春材の細胞は大きくまた細胞膜が薄いために、断面における相対的細胞実質の厚さが少なくなることによる。しかし、これは単にそのX線遮断層の厚さの差のみであろうか。photo. 2に、スギのほか、ヒノキ、アカマツ、クロマツ、モミ、ツガ、ネズミサシ、などの廃材を組合せて張り合せた集成柱の断面の普通写真とX線写真を参考のために示したが、その年輪模様は極めて多様である。針葉樹の各樹種によって異なるはもちろん、同一樹種でも各年輪および部分によって大きな差がみられる。従来の顕微鏡写真における夏材層の大きさや細胞の大きさには、これほどの差は感じられなかったものである。したがって、これは単に厚さのみの差ではなく、(4)式にて示された因子の中、成分となる物質の原子番号や密度とも大いに関係しているのではないか。現在さらにこの点について重点的な研究を進めているので、この報告ではこれぐらいで留めておく。

(4) 偽年輪および着色帯

筆者は前にスギ肥培木の研究において、肥培木に偽年輪および偽年輪様の着色帯が多く出現することを認めこれを報告した⁸⁾⁹⁾。これはまた川名、川口両氏¹⁰⁾の湿地帯にて栽培したスギについて、着色生長輪と呼ばれた模様とほとんど同種のもので、偽年輪とは本質的にちがう組織である。川名氏らの報告では、その模様はこの異常組織が単独に出現するというのに対して、筆者らの肥培スギの研究では、普通偽年輪と呼ばれる細胞膜の肥厚を伴った層もその中に存在するという点に相違があった。photo. 1の試片についてはスギ肥培木の研究の第2報⁹⁾の試験木F₈と同一のものである。いまその顕微鏡写真と対比してみるといままでも肉眼や顕微鏡で数え得た縞模様よりもさらに数多い層が見られることと、X線写真では偽年輪層と着色帯層との区別は明瞭でないことがわかった。いまphoto. 1の第2年輪の一部を拡大してphoto. 3に示すが、このうち中間に二本偽年輪を含むが、このX線写真のみではどれかよくわからない。また鹿児島県産の肥培木F₇の中心部より3つほどの年輪模様を拡大してphoto. 4に示したが、これのみではその模様のうちどれが偽年輪でどれが着色帯かは区別がつきにくい。一番外側の年輪の色の濃い偽年輪様の縞模様も、前報で示した顕微鏡写真と同じ着色帯であって、樹脂を含んだ柔細胞が点在し、その柔細胞の内容物が周囲の仮導管や射出線仮導管の細胞膜ににじんで着色したものである。つまり偽年輪細胞のようにあたかも夏材細胞と同じく細胞膜の肥厚によるX線の吸収ではなく、柔細胞内物質によるX線の吸収によって生ずる縞模様である。したがってその樹脂成分の量とか、厚さ、比重が、その陰影に大きく関係して来るので、この点についても今後さらに詳しい研究が望まれる。

(5) アテ材

前に示したphoto. 2の一部に、右側の上から5層目の板にスギのアテ材を含む材が使われているが、そのX線像は黒く、X線の吸収の非常に大きかったことがわかると思う。photo. 5にアテ材を含むヒノキと同じくアテ材を含むスギの肥培木をphoto. 6に示す。いずれも黒化度の濃いX線のポジ写真からみて、アテ材層のX線の吸収力の大きさがわかると思う。これはアテ材という異常組織が、主に組織学的には細胞膜の異常肥厚によるものであることから、容易にうなずける。ただこれは細胞膜の肥厚と比重の増大のみが主原因であって、内容物質の成分の差が関係するかどうかは今後の研究にまたねばならぬが、この2つのX線写真を見て、従来の

顕微鏡のみでの観察では見落されていたアテ材の形成過程とも思われる中間的な層や、アテ材への移行層、部分的変化など微妙な濃淡がキャッチされていることは、この種の研究に今後大いに役立つのではなからうか。

(6) 密度

密度については、すでに春材、夏材、偽年輪、着色帯、アテ材などの項において述べたように、組織の厚さとそれぞれ関係して来るので、ここでは特に述べる必要もないが、逆にこれらX線の像の濃淡は、それぞれの部分の密度の差を示すと考えると、これはなかなか重要なことである。もちろん前に述べた(4)における構成物質の原子番号や、物質そのものの密度も当然関係してくることは当然だが、それらは着色帯を除いては各組織ともあまり本質的な差が考えられない以上、これが木材組織の比重の差異を現わしているとも考えられ、今後の研究に大きな興味を感じるものである。

(7) 心材と辺材

いままでに示した写真ではまだ幼令木が多く、心材形成の顕著なものは示されていないが、photo. 2の部分には多少心材とはっきりわかるものがみられる。また photo. 4の中心部の年輪は相対的にX線のポジ写真では黒化度がきつく、他よりも吸収の多いことが示されている。これは心材形成にあたって、心材形成物質の沈積による比重の増大とX線遮断層の厚さの増大が微妙に反映していると思われる。

(8) 節および枝の分岐

今まで示した写真の中で、photo. 2の右上より2つ目と3つ目に節のX線写真像が示されているが、上は死節、下は明節で上の死節では節特有の物質の集積と密度の高さによってX線の吸収が増すことがわかる。これはまた当然枝の分岐点および生節のX線写真像でも明瞭に現われてくる。photo. 1の左下斜の陰影 photo. 6の2本の放射方向の陰影は共にその分枝点付近の組織の実態を写し出している。もしさらに断面の位置や方向を、いろいろと変えて撮影することによって、従来の顕微鏡では得られなかった、これら分枝点の構成が明瞭になるのではなからうか。

(9) その他介在物質について

木材中に砂とか針釘などの鉱物や金属が介入した場合の影像是極めて明瞭であることはX線の吸収力の差の大ききからいって当然であるが、photo. 4の中心部に近い年輪層で、特異なX線吸収物質が介在することが示されている。いまのところ樹脂であるか、枝の中心部に含まれる物質と同一のものか、あるいは心材形成物質沈積のはじまりかはあまり微量なのでよくわからないが、今後分光分析などの手段で確認したいと考えている。したがって、特殊成分の分布や、その追跡などにも、このX線像が使われる可能性も大いに考えられる。

§ 6. 針葉樹の年輪構成研究と超軟X線写真

以上僅かの試片の実例ではあったが、針葉樹木口面からのX線の照射による写真撮影で、その厚さと撮影条件を適当に選ぶことによって、その年輪構成は極めて鮮明に写されることがわかったと思う。そして春材、夏材、偽年輪や着色帯、アテ材などで、肉眼や従来の顕微鏡で見られなかった陰影がキャッチされることは、今後のこの種の研究に大いに活用されることとなるであろう。しかしながら、これがさらに厚くなった場合の繊維の乱れ、夏材層のX線吸収量の大きいことが原因となって、幹の外側からの照射撮影の困難なこと、映像の拡大率に限界があり、細胞膜

の細部にわたる研究にはまだまだ不十分なことは、今後の研究と装置の改良に充分の余地のあることを示している、しかしいずれにしてもこの種の器械には必ず性能に限界のあることは当然である。われわれはその限界を早く知ること必要であるが、その限界内での研究の可能性を極めることもより重大である。今後さらにこの点について研究を進めていくつもりである。

総 括

X線は木材のような不透明な物質も透過できるが、その透過量は、密度および細胞膜の厚さおよび木や板の試片の厚さと関係がある。X線の波長の長いものは短い波長のものよりもその透過力は弱い。

この報告は超軟X線（波長の最も長い）による木材および板材の内部構造の研究の一つであって、ここでは超軟X線写真によって二・三の針葉樹の年輪構成が示され研究された。

写真的条件は次のようなものである。装置：SOFTEX-EMB. 二次電圧：14 KVP. 二次電流：5 mA. X線管球と試片との距離：40 cm. 試片の厚さ（軸に対して直角断面）：0.7 cm. X線の照射時間10秒。フィルムの現像時間20°Cで10分間、実験の結果は photo. 1～6 に示したが、次の年輪組織のうち、春材と夏材、偽年輪と着色帯、アテ材、枝や節などの間のX線フィルム上のコントラストは明瞭に得られた、この方法は木材や板材の内部構造の研究に役立つものと考えられる。

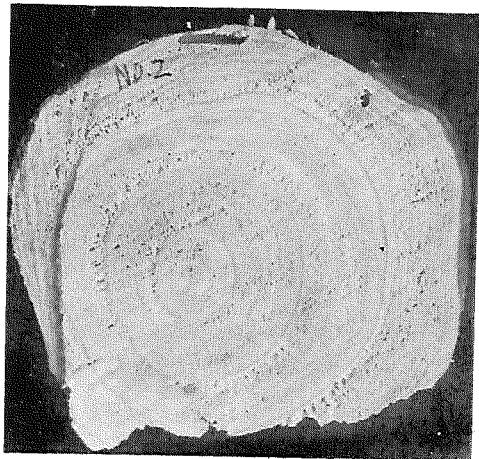
参 考 文 献

- 1) 飯塚徳義 (1956) : γ線による生立木（トドマツ）の内部腐朽鑑定法に関する研究。東大演報. 52. P143-164.
- 2) Stoker, S., (1948) : Pro. Ame. Wood Presservers' Assoc. (AWPA), 44.
- 3) Gregory, J. N. (1940) : X-ray and timber defects. Jour. Concil Sci. and Indus. Res., Div. Forest Prod. Repr. 76, Australia, Vol. 13, No 4.
- 4) Brown, H. P., Panshin A. T. and Forsaith, C. C. (1952) : Textbook of wood technology Vol. 2 P156-157.
- 5) Compton, A. H. and Allison, S. K. (1935) : X-rays in theory and experiment. (New york).
- 6) 柳瀬繁幸. 木村幾生 (1960) : レントゲンの取扱い方 (東京).
- 7) 畔柳鎮 (1953) : 木材ならびに樹木の分光化学的研究. (第3報) 発光スペクトルによる木材ならびに樹木中の化学元素の定性分析について. 岡大農報. 2, P92-106.
- 8) 石川達芳. 畔柳鎮 (1963) : スギ肥培木の材質に関する研究. (第2報) スギ肥培木の年輪構造. 岡大農報. 21, P17-25.
- 9) 畔柳鎮. 西田晃昭 (1964) : スギ肥培木の材質に関する研究. (第4報) スギ肥培木と対照木の年輪構成の差異について. 岡大農報. 23, P7-11.
- 10) Akira KAWANA and Massao KAWAGUCHI (1957) : Several aspects of the over-moist forestry on the sea coast of Kujukuri (III) On the Coloured growth bands appearing in the Well-grown planted Sugi Seedlings. 日本林学会誌. 39, 9, P323-327.

Photo. 1. Disk of fertilized sugi.

(×0.6)

a. Photograph of 35mm camera



b. X-ray Photograph

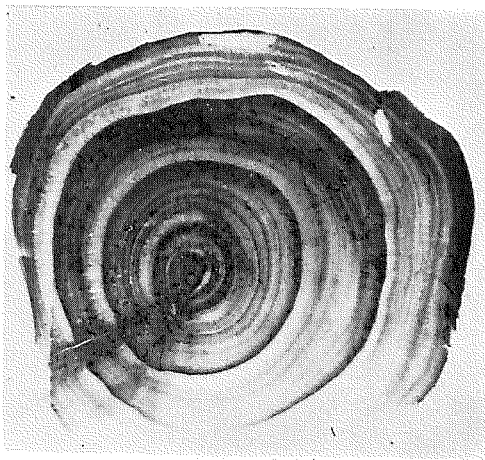
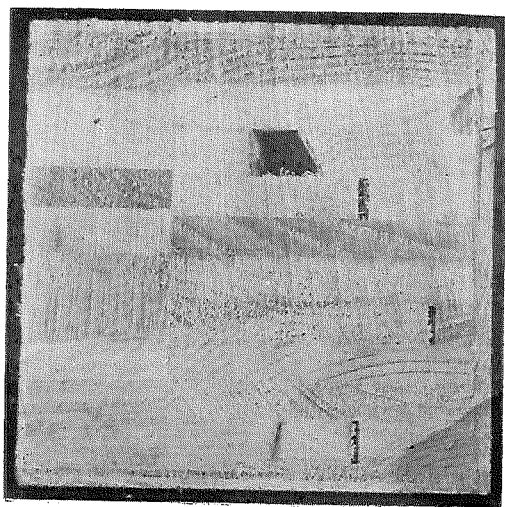


Photo. 2. Laminated wood of some coniferous woods.

(×0.6)

a. Photograph of 35mm camera



b. X-ray Photograph

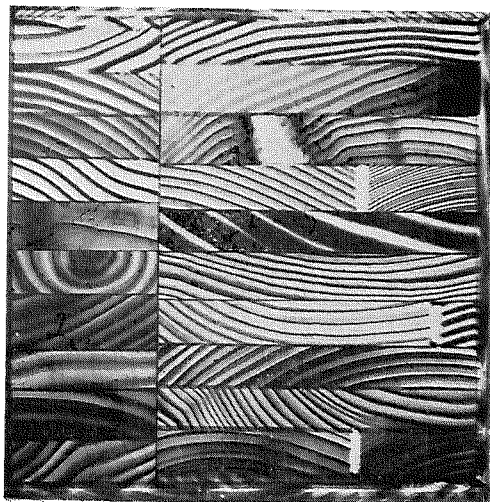
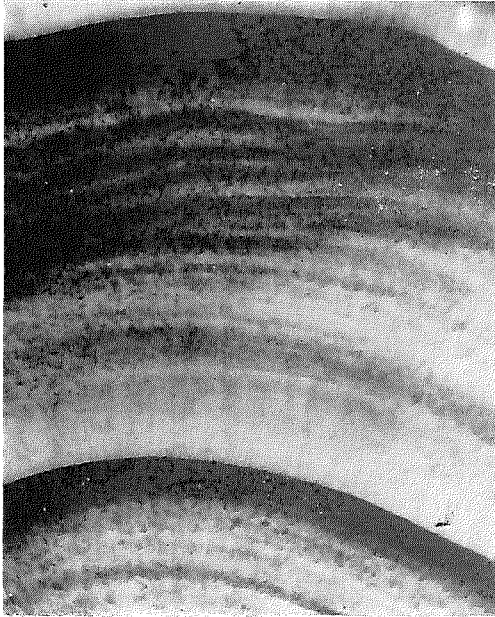
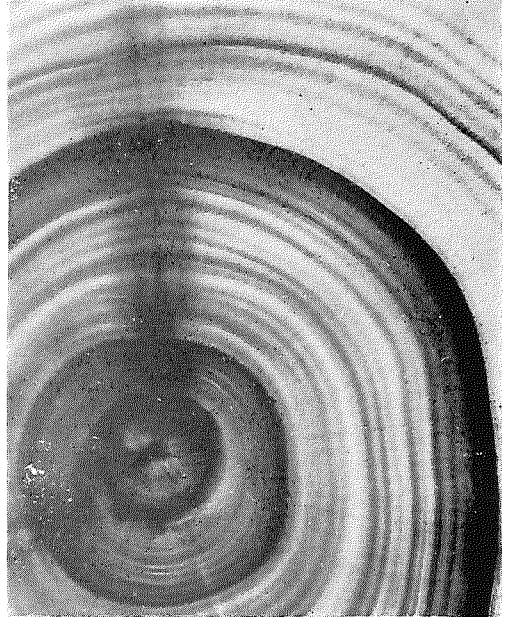


Photo. 3. False ring and coloured band.



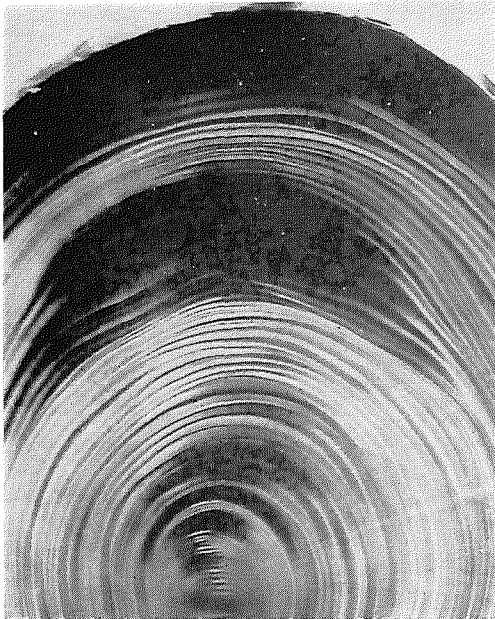
($\times 4.8$)

Photo. 4. Hart wood and branches.



($\times 2.8$)

Photo. 5. Compression wood of Hinoki.



($\times 1.7$)

Photo. 6. Compression wood of Sugi.



($\times 1.8$)

撮 影 条 件

- Photo. 1. b フィルム FG, 二次電圧 24 KVp, 二次電流 5 mA
露出時間 40 秒, 距離 40 cm, 厚さ 1.0~0.1 cm
- Photo. 2. b フィルム FG, 二次電圧 20 KVp, 二次電流 5 mA
露出時間 20 秒, 距離 40 cm, 厚さ 1.0 cm
- Photo. 3. フィルム HS, 二次電圧 14 KV, 二次電流 5 mA
露出時間 10 秒, 距離 40 cm, 厚さ 0.9 cm
- Photo. 4. フィルム HS, 二次電圧 14 KV, 二次電流 5 mA
露出時間 10 秒, 距離 40 cm, 厚さ 0.9 cm
- Photo. 5. フィルム HS, 二次電圧 14 KV, 二次電流 5 mA
露出時間 10 秒, 距離 40 cm, 厚さ 0.5 cm
- Photo. 6. フィルム HS, 二次電圧 14 KV, 二次電流 5 mA
露出時間 10 秒, 距離 40 cm, 厚さ 0.7 cm